การป้องกันการเกิดหยดน้ำบนผิวฉนวนที่หุ้มท่อนำความเย็น*

โดย..นายชำนาญ วิทูรปกรณ์*

ประเทศไทยเป็นประเทศในเขตร้อนชื้น มีการใช้ระบบปรับอากาศภายในอาคารกันมาก และกลายเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับอาคารสูง ปัญหาการเกิดหยดน้ำ (Condensation) บนผิวฉนวนที่หุ้มท่อนำความเย็น จึงมักเป็นปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นแล้วสร้างปัญหาต่างๆ มากมายเช่น ทำให้ฝ้าเสียหาย มีรอยคราบไม่สวยงาม หรือบางกรณีเป็นเชื้อรามีกลิ่นอับชื้นไม่พึงปรารถนา ในอาคารบางแห่งอาจมีผลต่อระบบไฟฟ้า เฟอร์นิเจอร์ และอื่นๆ *ดังรูปที่ 1, 2, 3 และ 4* พนักงานที่ดูแลอาคารต้องวุ่นวายแก้ปัญหา หลายอาคารการปฏิบัติงานเพื่อแก้ปัญหาได้เป็นส่วนหนึ่งของการทำงานประจำ เช่นการหิ้วถังน้ำที่มาจากการเกิดหยดน้ำไปเททิ้ง แล้วนำกลับมาวางตำแหน่งเดิม, การเช็ดถูบริเวณดังกล่าวทุกวัน, การเปลี่ยนฝ้าหรือทาสีใหม่ทุกๆ เดือน, ต้องวางกระถางต้นไม้ ณ บริเวณที่เกิดหยดน้ำ, การทำรางรองหยดน้ำ, การใช้พัดลมเป่าบริเวณที่เกิดหยดน้ำทั้งที่ตัวฉนวนหุ้มท่อน้ำเย็นและวัสดุต่างๆ ในบริเวณที่เกิดหยดน้ำ และมีอาคารไม่น้อยที่แก้ไขไม่ได้ต้องยอมรับกับสภาพดังกล่าว จากปัญหาดังกล่าวข้างต้นนอกจากต้องศึกษาหาความหนาของฉนวนที่ถูกต้องแล้ว ยังต้องมีความเข้าใจเทคนิคในเรื่องการติดตั้งและการเคลื่อนไหวของความชื้นอีกด้วย ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. เทคนิคในเรื่องการติดตั้งและความเข้าใจในเรื่องการเคลื่อนย้ายของความชื้น

แบ่งเป็นหัวข้อต่างๆ ดังนี้

1.1 ***การติดตั้งที่ไม่ประณีตหรือไม่ได้หุ้มฉนวน*** การติดตั้งตามข้อโค้ง งอ รอยต่อต่างๆ ที่ทำให้ฉนวนไม่ได้ความหนาตามที่ต้องการ, ท่อนำความเย็นบางส่วนไม่มีการหุ้มฉนวน, การไม่ทากาวติดรอยต่อให้เรียบร้อย, การโดนกดทับจนทำให้ฉนวนบาง, การฉีกขาดของฉนวน, การไม่ใช้ฉนวนชนิดแข็งรองรับตรงจุดแขวนทำให้ฉนวนบางลง รวมถึงการติดตั้งที่ทำให้ฉนวนชิดหรือสัมผัสกับผนัง, ฝ้า, ท่อส่งลม หรือท่อที่หุ้มฉนวนด้วยกันเองทำให้ไม่มีการไหลเวียนของอากาศรอบท่อน้ำเย็นที่หุ้มฉนวน *ดังรูปที่ 5, 6, 7 และ 8* ลักษณะการติดตั้งที่ไม่ประณีตหรือไม่ได้หุ้มฉนวนเป็นปัจจัยที่สำคัญมากปัจจัยหนึ่งที่จะช่วยลดหรือแก้ปัญหาการเกิดหยดน้ำ ดังนั้นจึงต้องควบคุมดูแลในระหว่างการติดตั้งให้เรียบร้อย

1.2 ***ท่อนำความเย็นที่อยู่ภายนอกอาคาร หรือความชื้นจากภายนอกสามารถเข้าในอาคารได้*** อากาศที่อยู่ภายนอกอาคารเป็นบริเวณที่ไม่สามารถควบคุมความชื้นได้ จึงต้องยอมรับสภาพที่จะเกิดหยดน้ำบนฉนวนได้ทุกครั้งที่มีความชื้นสูงกว่าที่คำนวณไว้ ในช่วงเที่ยงวันถึงบ่ายความชื้นจะต่ำประมาณ 30-60 %RH ในขณะที่เวลากลางคืนถึง 05.00 น. ความชื้นจะสูงมากประมาณ 80-100 %RH การเกิดหยดน้ำบนยอดหญ้า แสดงถึงปริมาณความชื้นสูงมากในเวลากลางคืนดัง *กราฟที่ 1* แสดงปริมาณความชื้นที่แปรเปลี่ยนโดยทั่วไปใน 1 วัน และ*ตารางที่ 1 และ 2* แสดงความชื้นในแต่ละวันและแต่ละปีของกรุงเทพมหานคร (ข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยา)

* ผู้บริหารกลุ่มบริษัท อีสเทิร์น โพลีเมอร์ กรุ๊ป จำกัด (มหาชน)

Areas with low ventilation and high humidity. Condensation creates unpleasant odour and spreads bacteria.

รูปที่ 1

Condensation damages the false ceiling and destroys the image of building.

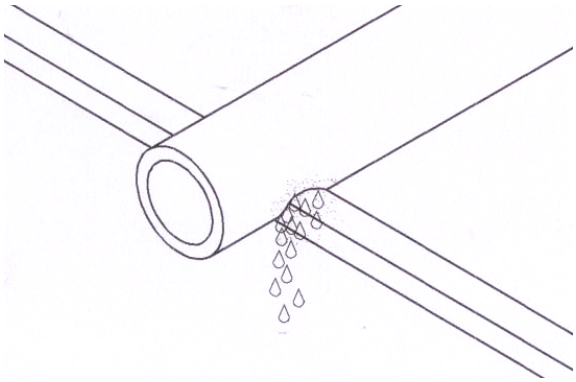
รูปที่ 2

Condensation also destroys carpets, furniture and other equipments.

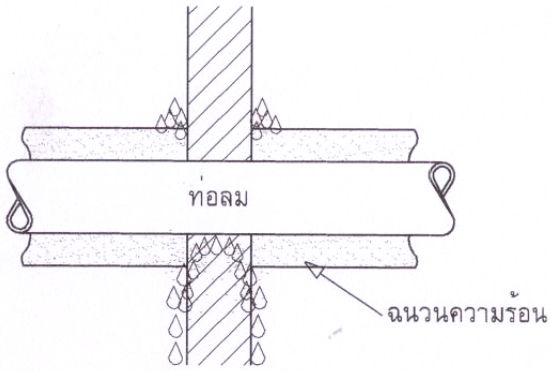
รูปที่ 3

Loss of energy - The cooling machines have to work harder due to damaged insulation.

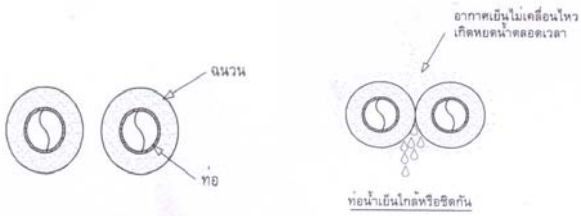
รูปที่ 4



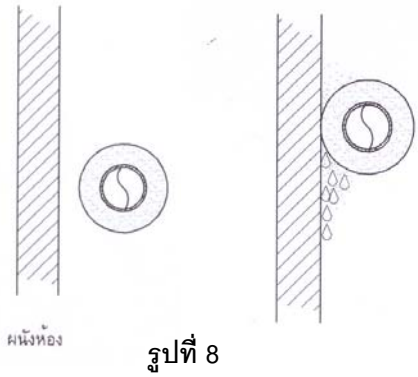
รูปที่ 5



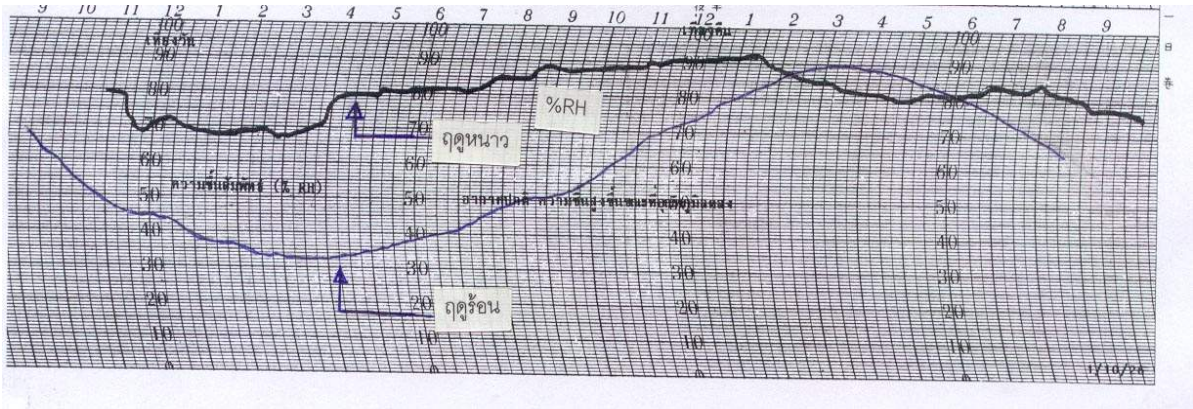
รูปที่ 6



รูปที่ 7



รูปที่ 8



กราฟที่ 1 กราฟแสดงปริมาณความชื้น (%RH) ที่แปรเปลี่ยนโดยทั่วไป 1 วัน

Station: BANGKOK METROPOLIS

Relative humidity (%)
March 2000

Time / Date	0100	0400	0700	1000	1300	1600	1900	2200	Mean	Max	Min
1	82	86	76	74	71	75	77	81	78	86	71
2	77	76	78	66	63	64	67	72	70	78	63
3	74	75	79	54	49	55	63	69	65	79	49
4	83	86	91	65	56	56	74	80	74	91	56
5	85	89	88	68	53	57	70	83	74	89	53
6	86	89	88	72	60	51	77	86	76	89	51
7	86	89	89	70	56	60	74	86	76	89	56
8	87	87	88	64	61	57	76	84	76	88	57
9	84	88	86	66	56	52	72	80	73	88	52
10	83	84	94	66	59	58	77	81	75	94	58
11	82	86	86	68	54	46	75	82	72	86	46
12	85	89	68	34	27	33	50	56	55	89	27
13	68	62	62	44	36	29	46	67	52	68	29
14	71	84	76	50	33	28	39	76	57	84	28
15	83	80	86	66	36	38	61	78	66	86	36
16	82	84	83	33	31	27	45	61	56	84	27
17	71	81	80	55	40	32	49	59	58	81	32
18	73	78	82	64	51	44	63	74	66	82	44
19	80	83	84	66	52	49	64	78	70	84	49
20	85	85	85	68	60	54	65	72	72	85	54
21	68	81	81	60	53	51	62	77	67	81	51
22	81	82	85	65	54	50	65	77	70	85	50
23	83	85	86	66	53	53	70	78	72	86	53
24	81	81	88	99	91	70	78	80	84	99	70
25	83	85	90	65	50	47	54	70	68	90	47
26	76	75	65	58	50	54	59	73	64	76	50
27	76	77	72	56	51	51	63	68	64	77	51
28	73	74	78	50	45	56	73	77	66	78	45
29	81	83	85	92	75	70	81	85	82	92	70
30	83	86	88	72	60	65	77	80	76	88	60
31	83	85	88	72	57	54	77	83	75	88	54
MEAN	80	82	82	63	53	51	66	76	69	85	50
Max.	87	89	94	99	91	75	81	86			
Min.	68	62	62	33	27	27	39	56			

ตารางที่ 1

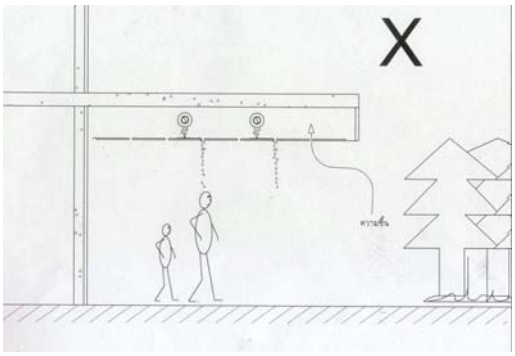
Station: BANGKOK METROPOLIS

Relative humidity (%)
September 2000

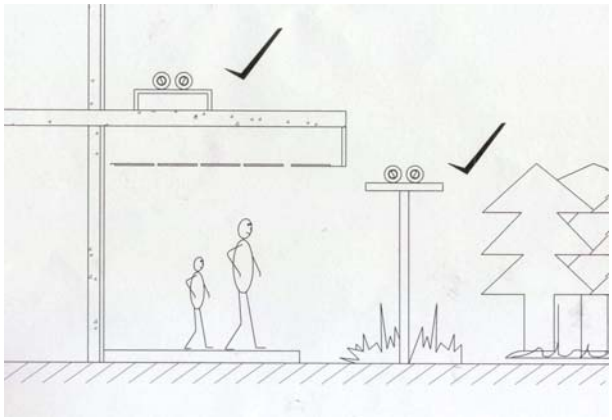
Time / Date	0100	0400	0700	1000	1300	1600	1900	2200	Mean	Max	Min
1	88	89	85	70	63	98	87	93	84	98	63
2	93	91	92	74	61	71	80	79	80	93	61
3	80	85	87	81	61	96	96	94	85	96	61
4	91	95	93	69	61	75	88	89	83	95	61
5	94	93	93	86	71	72	93	95	87	95	71
6	88	89	88	71	66	67	80	85	79	89	66
7	75	80	80	67	58	68	80	90	75	90	58
8	80	78	77	63	58	54	63	72	68	80	54
9	72	72	73	68	58	61	77	74	69	77	58
10	73	73	76	59	54	53	71	71	66	76	53
11	73	74	74	65	62	71	65	68	69	74	62
12	70	77	77	71	62	67	90	85	75	90	62
13	80	84	81	60	57	58	68	74	70	84	57
14	81	81	78	61	62	62	68	75	71	81	61
15	82	90	89	77	62	65	85	87	80	90	62
16	84	81	86	65	49	49	59	74	68	86	49
17	69	73	73	47	40	47	60	72	60	73	40
18	73	81	81	53	54	89	88	80	75	89	53
19	86	93	87	71	75	97	91	91	86	97	71
20	92	94	88	78	68	69	79	85	82	94	68
21	88	89	88	72	59	67	92	90	81	92	59
22	91	92	90	74	63	64	81	84	80	92	63
23	88	91	90	68	63	54	75	83	77	91	54
24	87	90	91	89	69	64	72	74	80	91	64
25	83	91	95	80	61	75	73	82	80	95	61
26	81	85	87	61	54	53	84	93	75	93	53
27	92	93	87	66	58	65	72	89	78	93	58
28	93	93	93	73	87	80	87	95	88	95	73
29	97	97	97	92	78	69	81	89	88	97	69
30	90	90	96	78	67	64	75	83	80	96	64
MEAN	84	86	86	70	62	68	79	83	77	89	60
Max.	97	97	97	92	87	98	96	95			
Min.	69	72	73	47	40	47	59	68			

ตารางที่ 2

ความชื้นที่ควบคุมไม่ได้ ถ้าไม่หาสถานที่ติดตั้งท่อนำความเย็นที่เหมาะสมแล้วจะเกิดปัญหาเรื่องหยดน้ำ *ดังรูปที่ 9* ทำให้ผู้ออกแบบต้องหาสถานที่ที่เหมาะสมในการติดตั้งท่อนำความเย็นที่เมื่อเกิดปัญหาหยดน้ำแล้วไม่สร้างปัญหา เช่นการวางแนวท่อนำความเย็น บนระเบียง, อยู่เหนือสวน *ดังรูปที่ 10*

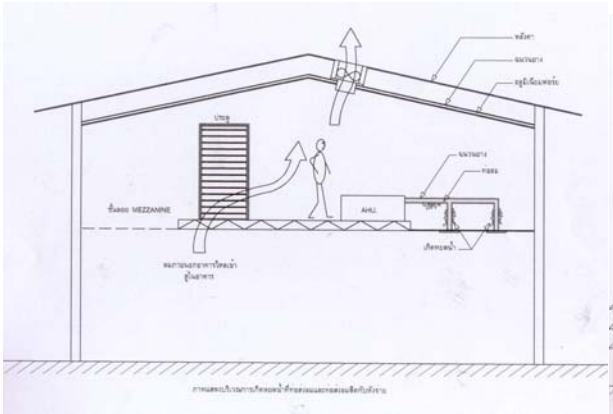


รูปที่ 9

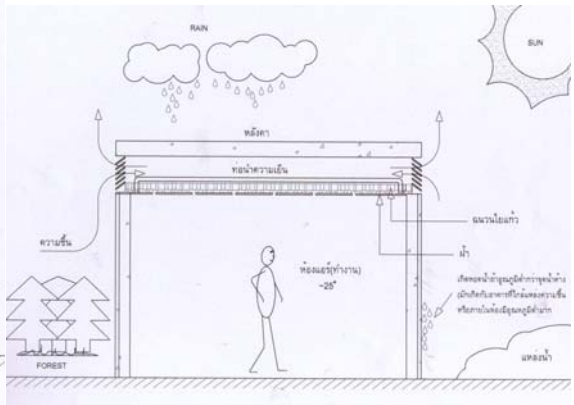


รูปที่ 10

นอกจากนี้ยังรวมถึงการออกแบบของอาคารที่ให้ความชื้นไหลผ่านเข้าสู่อาคารได้ด้วย อาจจะมีความคิดในแง่ที่ทำให้ลดความร้อนจากแสงอาทิตย์ เข้าในตัวอาคาร แต่บังเอิญว่ามีการวางท่อนำความเย็นในบริเวณดังกล่าว ลักษณะดังกล่าวทำให้บริเวณดังกล่าวไม่สามารถควบคุมความชื้นได้ จึงทำให้เกิดปัญหาหยดน้ำ *ดังรูปที่ 11 และ 12* การแก้ปัญหาจึงต้องทำให้บริเวณดังกล่าวควบคุมความชื้นได้ เช่น การปิดไม่ให้ความชื้นจากภายนอกเข้าในอาคารได้ การให้มีอากาศแห้งหรืออากาศจากเครื่องปรับอากาศเข้าไปในบริเวณดังกล่าวบ้าง หรือการทำให้บริเวณดังกล่าวรองรับปัญหาหยดน้ำได้เช่นการทำเป็นพื้นคอนกรีต จัดหาแผ่นพลาสติกปูพื้นกันไม่ให้หยดน้ำไปสร้างปัญหาที่อื่นๆ ได้เป็นต้น



รูปที่ 11

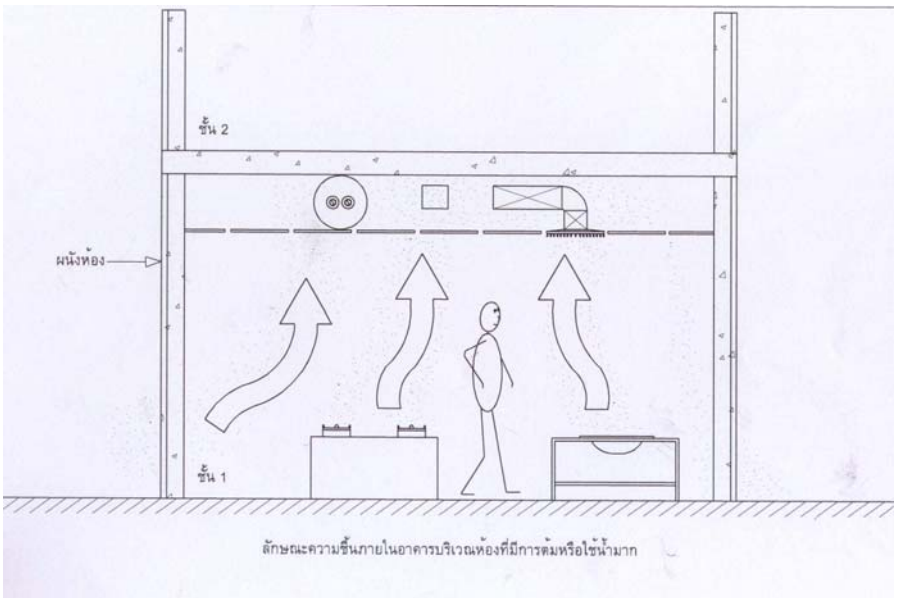


รูปที่ 12

1.3 ท่อนำความเย็นที่อยู่ภายในอาคารที่ความชื้นจากภายนอกไม่สามารถเข้าในอาคารได้

โดยปกติความชื้นจากภายนอกสามารถเข้าอาคารได้ ซึ่งมักเข้ามาทางประตู ระบบปรับอากาศสามารถลดความชื้นอากาศภายในอาคารได้ แต่ถ้าเข้ามามากๆ ก็จะทำให้เกิดหยดน้ำบนหัวลมจ่ายแอร์ได้ ดังนั้นประตูที่มีคนเข้าออกมาก จึงนิยมติด air curtain เพื่อทำ precool air และขณะเดียวกันก็สามารถแก้ปัญหาหยดน้ำบนหัวจ่ายได้อีกด้วย ปัญหาการเกิดหยดน้ำภายในอาคารที่ความชื้นจากภายนอกไม่สามารถเข้าในอาคารได้ แบ่งได้เป็น 2 กรณีคือ

1.3.1 กรณีที่ 1 มีแหล่งความชื้นภายในอาคาร แหล่งความชื้นในอาคารมาจากห้องครัว, ห้องน้ำ, ห้องซักล้าง, ห้องหรือบริเวณอื่นๆ ที่มีการใช้น้ำมาก ห้องหรือบริเวณเหล่านี้ทำให้เกิดปัญหาหยดน้ำขึ้นได้ *ดังรูปที่ 13* การแก้ไขสามารถกระทำได้หลายวิธีอาทิเช่น การติดระบบระบายอากาศขึ้นออกจากอาคาร, การหลีกเลี่ยงการติดตั้งท่อนำความเย็นผ่านบริเวณดังกล่าว, การแยกห้องดังกล่าวออกจากตัวอาคาร หรือติดตั้งท่อนำความเย็นที่เกิดหยดน้ำแล้วไม่สร้างปัญหาอย่างเช่นในช่องชาร์ปเป็นต้น



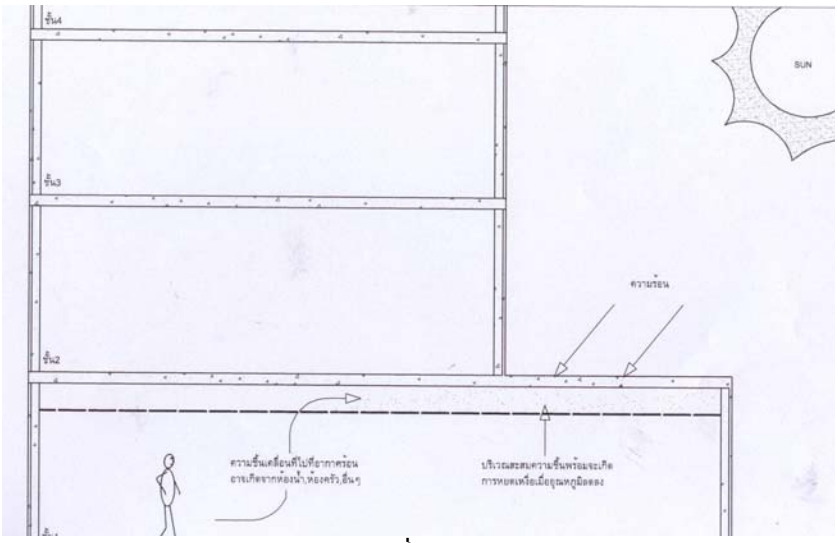
รูปที่ 13

1.3.2 กรณีที่ 2 การเคลื่อนย้ายความชื้นภายในอาคาร ความชื้นจะเคลื่อนย้ายจากที่มีมากไปหาที่มีน้อย ถ้าอุณหภูมิใกล้เคียงในการเคลื่อนย้ายความชื้นก็จะช้าเช่น บริเวณหนึ่งมีความชื้น 70 %RH 27°C แต่ถ้ามีอุณหภูมิและความชื้นที่แตกต่างกันมาก ความชื้นจะมีการเคลื่อนย้ายเร็วมาก ปริมาณความชื้นที่อุณหภูมิต่างๆ กัน *ดังตาราง 3 และ รูปที่ 14* แสดงการเกิดหยดน้ำบนท่อนำความเย็นจากการเคลื่อนย้ายความชื้น ความชื้นจะไปสะสมอยู่ที่บริเวณที่มีอุณหภูมิสูง แต่ตอนดึกอุณหภูมิอากาศบริเวณดังกล่าวลดลงมาก อากาศที่อุณหภูมิต่ำความสามารถในการดูดความชื้นจะต่ำลงด้วย ทำให้ค่าความชื้นสัมผัส (% RH) สูงขึ้นมากจนในบางแห่งมีสภาพเป็นหมอกอยู่บนช่องเหนือฝ้า วัสดุต่างๆ นอกจากฉนวนแล้ว เช่นโครงเหล็ก, ผนัง, ปูนซิเมนต์, แผ่นฝ้า และวัสดุอื่นๆ จะเปียกชื้น การแก้ไขปัญหานี้มีหลายวิธี เช่นการใส่แผ่นฉนวนการสร้างหลังคา หรือทำสวนบนดาดฟ้า เพื่อลดอุณหภูมิของอากาศในช่องฝ้า, การระบายอากาศและการกั้นไม่ให้อากาศไหลผ่านบริเวณดังกล่าวเป็นต้น

gram / อากาศแห้ง 1 kg

องศา C	%RH 40	50	60	70	80	90	100
0	1.5	1.9	2.3	2.6	3.0	3.4	3.8
5	2.1	2.7	3.2	3.8	4.3	4.9	5.4
10	3.0	3.8	4.6	5.3	6.1	6.9	7.6
15	4.2	5.3	6.3	7.4	8.5	9.6	10.6
20	5.8	7.3	8.7	10.2	11.7	13.2	14.7
25	7.9	9.9	11.9	13.9	16.0	18.0	20.1
30	10.6	13.3	16.0	18.8	21.6	24.4	27.2
35	14.1	17.8	21.4	25.1	28.9	32.7	36.6

ตารางที่ 3 ตารางแสดงปริมาณความชื้น(น้ำหนักน้ำที่อยู่ในอากาศมีหน่วยเป็นกรัม) ที่อุณหภูมิและความชื้นต่างๆ ซึ่งหาได้จากการดู Psycometric chart



รูปที่14

2. การหาความหนาที่เหมาะสม

ในอดีตที่ผ่านมามีการใช้ฉนวนหลายประเภท ความหนาของฉนวนแต่ละประเภทแตกต่างกัน เริ่มตั้งแต่การใช้ฉนวนใยแก้ว ที่มีการหุ้มหนาระหว่าง 1.5 นิ้ว (38 มม.) จนถึง 4 นิ้ว (100 มม.) ที่ความหนาแน่น 2-4 ปอนด์/ลูกบาศก์ฟุต (32-64 กก./ ลูกบาศก์เมตร) และหุ้มทับด้วยแผ่นอลูมิเนียมฟอล์ย หรือวัสดุกันความชื้นอื่นๆ (Water Vapor Barriers) ฉนวนใยแก้วเป็นฉนวนที่มีโครงสร้างเซลเปิด ทำให้ความชื้นสามารถแทรกซึมเข้าไปในเนื้อฉนวนได้ ทำให้ฉนวนใยแก้วมีค่าความเป็นฉนวนลดลง จึงเกิดหยดน้ำและสร้างปัญหามากขึ้น จนอาจทำให้ท่อโลหะที่ใช้ในระบบสึกกร่อน ค่าความเป็นฉนวนของใยแก้วแปรเปลี่ยนไปตามความชื้นที่มีอยู่ในเนื้อฉนวน*ดังกราฟที่ 2* แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความชื้นในฉนวนกับค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (ค่า K) และ*ตารางที่ 3* แสดงค่า K เมื่อฉนวนใยแก้วมีความชื้นต่างๆ กัน จะเห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (ค่า K) จะลดลงจนอยู่ตัว เมื่อไม่มีความชื้นอยู่ในฉนวนเลย (ความชื้นเท่ากับ 0) และมีค่าสูงมากเมื่อมีความชื้นเพิ่มขึ้น แต่ถ้าน้ำอยู่ในรูปของเหลวจะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ 0.604 W/m K (4.2 Btu.in/ft^2.hr $^\circ$F) ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 21°C และน้ำที่อยู่ในรูปของแข็งจะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ 2.232 W/m K (15.5 Btu.in/ft^2.hr $^\circ$F) ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 0°C ขณะที่ฉนวนทั่วไปที่ไม่มีความชื้นเลยจะมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่ 0.035 $\sim$ 0.040 ที่อุณหภูมิเฉลี่ย 20°C มาตรฐานสากลต่างๆ จะวัดค่า K ของฉนวนเมื่อฉนวนนั้นไม่มีความชื้น จากลักษณะงานดังกล่าวทำให้ฉนวนใยแก้วไม่เหมาะสมในการหุ้มท่อนำความเย็น ถัดมาคือฉนวนโฟมโพลีสไตลีนโฟม ซึ่งมีคุณสมบัติที่ดีกว่าฉนวนใยแก้วคือ เป็นฉนวนชนิดเซลอัด (Interconnecting cell) ความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 1-2 ปอนด์/ลูกบาศก์ฟุต (16-32 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร) ร่วมกับการทาด้วยบิทูเมนต์ (Bitumen) หรือฟริ๊นโค๊ต และพันแน่นด้วยผ้าและทาทับด้วยบิทูเมนต์อีกชั้นหนึ่ง เพื่อทำหน้าที่เป็นวัสดุกันความชื้น (Water Vapor Barriers) ซึ่งมีคุณภาพดีกว่าการใช้ฉนวนใยแก้วมาก มีอายุการใช้งานได้นานยิ่งขึ้น ความหนาที่ใช้ประมาณ 1-3 นิ้ว (25-75 มม.) แต่ความชื้นก็ยังสามารถแทรกซึมเข้าไปในเนื้อฉนวนโพลีสไตลีนโฟมได้ ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนสูงขึ้น (แต่ช้ากว่าฉนวนใยแก้ว) ประกอบกับเป็นฉนวนที่ติดตั้งลำบากและเป็นฉนวนที่ติดไฟลามไฟง่าย แม้จะใส่สารกันไฟก็ยังเกิดหยดไฟไม่ผ่านมาตรฐานไฟทั่วไป ฉนวนที่ดีกว่าเข้ามาทดแทนฉนวนโพลีสไตลีน คือฉนวนเซลปิดที่ทำจากวัสดุอีลาสโตเมอร์ (Elastomer) ตามมาตรฐาน ASTM C534 เป็นฉนวนเซลปิดที่ความชื้นแทรกซึมไม่ได้หรือน้อยมาก มีความยืดหยุ่นสูงทำให้การติดตั้งง่าย ไม่มีช่องว่างของรอยต่อ จากโครงสร้างเซลปิดไม่มีความชื้นในเนื้อฉนวน ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนคงที่ ไม่แปรผันตามความชื้นในบรรยากาศ *ดังกราฟที่ 3* ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนที่คงที่ ของฉนวนเซลปิดที่ทำจากวัสดุอีลาสโตเมอร์ จึงสามารถนำมาหาค่าความหนาของฉนวน เพื่อใช้ป้องกันการเกิดหยดน้ำบนผิวฉนวนที่หุ้มท่อนำความเย็นได้อย่างถูกต้องมากกว่าฉนวนใยแก้วและฉนวนโพลีสไตลีนโฟมที่ผ่านมาสามารถใช้ Nomograph *ดังกราฟที่ 4* ได้ และใช้สูตร

คำนวณตามหลักวิชาการได้ ความหนาของฉนวนเซลปิดที่ใช้ในระบบปรับอากาศที่ใช้น้ำเย็น (Central Chilled Water System) ¾”-2” (19-50 มม.) ไม่ต้องหุ้มหรือทาเคลือบด้วยวัสดุกันความชื้น (Moisture Barrier Material) เหมือนกับฉนวนใยแก้วและโพลีสไตลีนโฟม

ขนาดความหนาของฉนวนเซลปิดวัสดุอีลาสโตเมอร์ (Closed Cell Elastomer Thermall Insulation) สำหรับใช้ป้องกันการเกิดหยดน้ำบนผิวฉนวนหุ้มท่อน้ำเย็น สามารถใช้ Nomograph ซึ่งค่าที่ได้จากวิธีดังกล่าวเป็นค่าที่ใช้ทั่วไป สำหรับท่อ ¼”-5” IPS เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ (h_a) อยู่ในช่วงประมาณ 8.0-10.0 W/m^2K ไม่สามารถใช้กับท่อขนาดใหญ่ๆ ได้ ในปัจจุบันการคำนวณค่าความหนาของฉนวนเซลปิด เพื่อป้องกันการเกิดหยดน้ำ (Condensation) สามารถคำนวณได้ง่ายมาก โดยใช้ Computer สูตรคำนวณดังนี้

- สำหรับพื้นราบ (Flat Plate)

$$\text{Insulation Thickness} = \frac{k}{h_a} \cdot \frac{(T_s - T_{op})}{(T_{db} - T_s)}$$

เมื่อ k = ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวน

h_a = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ

T_s = อุณหภูมิผิวฉนวน

T_{op} = อุณหภูมิของสารนำความเย็น

T_{db} = อุณหภูมิห้อง

- สำหรับท่อ (Pipe Line)

$$R_o . \ln (R_o / R_i) = \frac{k}{h_a} \cdot \frac{(T_s - T_{op})}{(T_{db} - T_s)}$$

เมื่อ k = ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวน

h_a = ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ

T_s = อุณหภูมิผิวฉนวน

T_{op} = อุณหภูมิของสารนำความเย็น

T_{db} = อุณหภูมิห้อง

R_o = รัศมีของท่อที่หุ้มฉนวนแล้ว

R_i = รัศมีของท่อโลหะ (Outside Radios of Pipe)

เพื่อเป็นการง่ายต่อการคำนวณ สามารถหาโปรแกรมสำเร็จรูป เพื่อคำนวณหาความหนาฉนวนเพื่อป้องกันการเกิดหยดน้ำ หรือพลังงานที่ประหยัดได้จากบริษัทผู้ผลิตฉนวนเซลปิดชนิดยืดหยุ่นสูง เช่นโปรแกรมสำเร็จรูป Aeroflex 2000 ของฉนวนยี่ห้อ Aeroflex เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ควรศึกษาสูตรการหาความหนาฉนวนดังกล่าวเพิ่มเติม ซึ่งจะทำให้เข้าใจในการเลือกใช้ค่าต่างๆ ในการคำนวณมีรายละเอียดเป็นข้อๆ ดังต่อไปนี้

① ค่า k ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของฉนวนค่า k จะแปรผันตามอุณหภูมิที่ใช้งาน ในการคำนวณจะใช้ค่า k ที่อุณหภูมิเฉลี่ยของท่อนำความเย็นกับอุณหภูมิผิวฉนวนที่ต้องการ

② ค่า T_s อุณหภูมิผิวฉนวน อุณหภูมิผิวฉนวนต้องสูงกว่าจุดควบแน่นของความชื้นเป็นหยดน้ำ หรือนิยมเรียกว่าจุดน้ำค้าง (Dew Point) อุณหภูมิที่เกิดควบแน่นเป็นหยดน้ำขึ้นอยู่กับค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%RH, Percent Relative Humidity) *ตารางที่ 4* เป็นตารางแสดงอุณหภูมิที่เกิดการควบแน่นเป็นหยดน้ำ ที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) ต่างๆ กัน โดยทั่วไปในประเทศไทยนิยมคำนวณที่ 80 หรือ 85 %RH อุณหภูมิห้องที่ 30 หรือ 35°C ดังนั้นเมื่อกำหนดค่าที่ใช้คำนวณแล้วต้องควบคุมให้บริเวณติดตั้งมีเงื่อนไขตามที่ตั้งไว้ในพื้นที่ที่มีความชื้นสูงมากเช่น ติดทะเล, ติดแหล่งน้ำขนาดใหญ่, ล้อมรอบด้วยภูเขาต้นไม้ ควรออกแบบอาคารและบริเวณที่ติดตั้งท่อนำความเย็นผ่านอย่างรอบคอบ ควรหลีกเลี่ยงการใช้ค่า 90 %RH, 95 %RH เพราะนอกจากจะเปลืองค่าใช้จ่ายแล้วยังอาจส่งผลให้วัสดุโดยรอบเสียหายก่อนเวลาอันควร

%RH	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
อุณหภูมิที่เกิดการควบแน่น (°C)	18.4	20.0	21.4	22.7	23.9	25.1	26.2	27.2	28.2	29.1	30.0

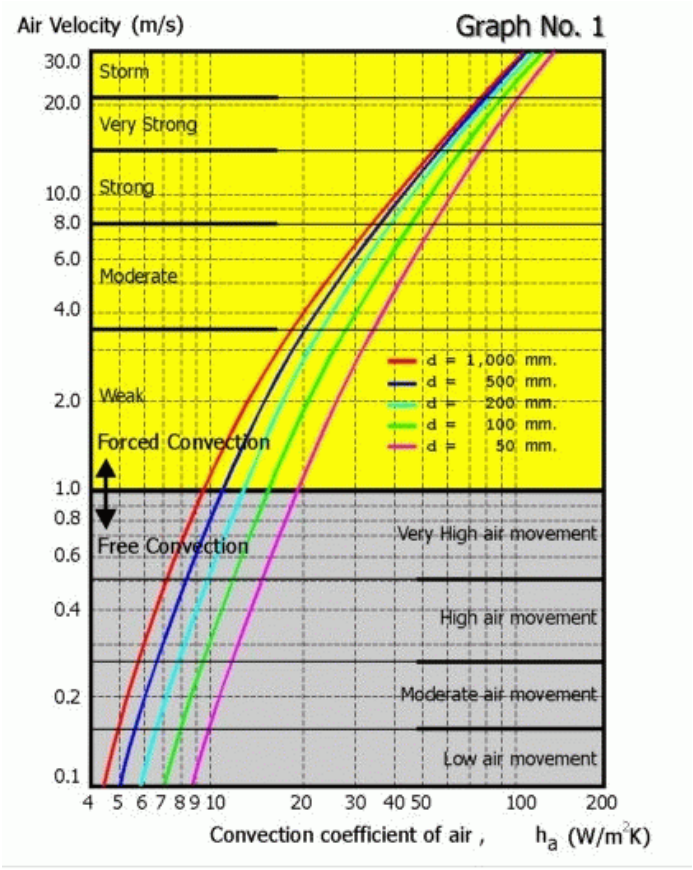
ตารางที่ 4 ตารางแสดงอุณหภูมิที่เกิดการควบแน่นเป็นหยดน้ำที่ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%RH) ต่างๆ กันที่อุณหภูมิห้อง 30°C

③ ค่า h_a ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ เมื่ออากาศมีการเคลื่อนไหวสัมผัสกับท่อนำความเย็น ที่มีอุณหภูมิแตกต่างกัน จะมีการพาความร้อนเกิดขึ้น การพาความร้อนแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ ประเภทพาความร้อนอิสระ (natural or free convection) และประเภทพาความร้อนที่ใช้แรงลม (forced air) การพาความร้อนอิสระ (natural or free convection) เป็นผลมาจากความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิแตกต่างกัน อากาศที่วิ่งจะช้า อาทิเช่น ห้องที่ถูกแสงอาทิตย์ส่องทำให้อุณหภูมิอากาศในห้องแตกต่างจากผนังห้องที่ร้อนขึ้น ทำให้อากาศหมุนเวียนอย่างอิสระ ส่วนการพาความร้อนที่ใช้แรงลม (forced air) นั้นคือการที่มีแรงลมพัดผ่านโดยทั่วไปมักหมายถึงการใช้พัดลม พัดอากาศทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนมีค่าสูงมาก เมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากการพาความร้อนอิสระ (natural or

free convection) *ดังตารางที่ 5 และ กราฟที่ 4* ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของค่า h_a กับความเร็วลมที่วิ่งผ่านท่อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่างๆ มีรายละเอียดดังนี้

Description	Air Velocity (m/s)	Air Velocity (km/hr)	ha value at various insulated pipe diameters (W/sq.m.K) 50mm.	100mm.	200mm.	500mm.	1,000mm.
Free Convection							
1. Low	0.10-0.15	0.36-0.54	8.6- 9.7	7.1- 8.0	5.9- 6.6	5.0- 5.6	4.5-5.0
2. Moderate	0.15-0.25	0.54-0.90	9.7-11.5	8.0- 9.4	6.6- 7.8	5.6- 6.8	5.0-5.9
3. High	0.25-0.50	0.90-1.80	11.5-15.0	9.4-12.0	7.8-10.0	6.8- 8.4	5.9-7.4
4. Very High	0.50-1.00	1.80-3.60	15.0-19.5	12.0-16.0	10.0-13.0	8.4-11.0	7.4-9.8
Forced Convection							
1. Weak	1.0- 3.4	3.6-12.2	19.5-34.0	16.0-28.0	13.0-23.0	11.0-20.0	9.8-19.0
2. Moderate	3.4- 8.0	12.2-28.8	34.0-55.5	28.0-48.0	23.0-40.0	20.0-36.0	19.0-34.5
3. Strong	8.0-14.0	28.8-50.0	55.5-83.0	48.0-66.0	40.0-60.0	36.0-55.0	34.5-55.0
4. Very Strong	14-21	50- 75	83-105	66- 90	60- 85	55- 80	55- 80
5. Storm	21-30	75-100	105-128	90-120	85-117	80-109	80-109

ตารางที่ 5 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของค่า h_a กับความเร็วลม



กราฟที่ 4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของ h_a กับความเร็วลม

- บริเวณปิดมีการเคลื่อนไหวของอากาศต่ำมาก (Blocked or still air areas) ค่า h_a อยู่ระหว่าง 01-5.0 W/m^2K บริเวณที่มักมีค่าดังกล่าว เช่นท่อนำความเย็นที่หุ้มฉนวนแล้วอยู่ใกล้กันมากหรือสัมผัสกันเอง สัมผัสผนัง ฝ้า เพดาน ท่อส่งลม หรือวัสดุอื่นๆ ที่กันไม่ให้อากาศไหลผ่านได้ การเคลื่อนไหวน้อยมากของอากาศทำให้เกิดปัญหาหยดน้ำเป็นอย่างมาก แม้ว่าจะใช้ฉนวนหุ้มหนามากก็ตามก็แก้ปัญหาไม่ได้ ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงด้วยการให้มีช่องว่างอย่างน้อย 3“ (75 มม.) สำหรับท่อต่ำกว่า 2” IPS และ 4” (100 มม.) สำหรับท่อที่ขนาดใหญ่กว่า 2” IPS สำหรับท่อนำความเย็นที่อยู่เหนือฝ้าหรือช่องชาร์ป ส่วนบริเวณที่มีการเคลื่อนไหวลมมาก เช่นในโรงงานโล่งๆ อาจจะห่างกัน 2“ (50 มม.) สำหรับท่อต่ำกว่า 2” IPS และ 3” สำหรับท่อที่มีขนาดใหญ่กว่า 2” IPS
- บริเวณที่มีลมเคลื่อนไหวช้า (Low air movement areas) เช่นบริเวณในช่องชาร์ป เหนือฝ้าและห้องใต้ดิน เป็นต้น ค่า h_a ที่ใช้คำนวณออยู่ระหว่าง 4.0-10.0 W/m^2K ขึ้นอยู่กับขนาดของท่อนำความเย็น
- บริเวณที่ลมเคลื่อนไหวปานกลาง (Moderate air movement areas) เช่นบริเวณในห้องต่างๆ พื้นที่เปิดในอาคาร มีการหมุนเวียนของอากาศดี ค่า ha ที่ใช้ในการคำนวณอยู่ระหว่าง 5.0-12.0 W/m^2K ขึ้นอยู่กับขนาดของท่อนำความเย็น
- บริเวณที่มีแรงลม (forced air areas) บริเวณที่มีการหมุนเวียนหรือการระบายของลมด้วยความเร็วมากกว่า 1 M/sec (3.6 km./hr) เช่นบรรยากาศภายนอกอาคาร, ภายใน Air Handling Unit, ห้องที่มีการใช้พัดลมพัดไปมา, ห้องซักผ้าหรือห้องครัวที่ต้องใช้การระบายอากาศในปริมาณมาก เป็นต้น ค่า ha อยู่ระหว่าง 12.0-100.0 W/m^2K

ค่า h_a มีผลต่อการคำนวณหาความหนาฉนวน เพื่อป้องกันการเกิดหยดน้ำบนผิวฉนวนเป็นอย่างมาก ต้องหลีกเลี่ยงการเดินท่อนำความเย็นที่ทำให้อากาศไม่มีการไหลเวียน หรือไหลเวียนต่ำมาก เพราะแม้จะใช้ฉนวนหนามากก็แก้ปัญหาดังกล่าวไม่ได้ ในทางกลับกัน ถ้าติดตั้งในบริเวณที่มีลมหมุนเวียนมาก (h_a มากกว่า 12.0 W/m^2K) ก็จะมีการสูญเสียพลังงานมากขึ้น บริเวณที่ใช้ติดตั้งท่อนำความเย็นโดยทั่วไปจะมีค่า ha อยู่ระหว่าง 6-10 W/m^2K ดัง*ตารางที่ 6* แสดงความหนาของฉนวนยางชนิดเซลปิด Aeroflex ที่ใช้ป้องกันการเกิดหยดน้ำ และการสูญเสียพลังงานที่มีค่า h_a ต่างๆ กัน ในทางกลับกัน การแก้ปัญหาหยดน้ำบนผิวฉนวนในบางบริเวณจะแก้ไขโดยให้มีลมพัดผ่านบริเวณดังกล่าว

h_a	2	4	6	8	10	12	20	40	60
ความหนาฉนวนที่ใช้ป้องกันหยดน้ำ (mm.)	69.3	40.6	29.6	23.6	19.8	17.1	11.2	6.2	4.3
พลังงานที่สูญเสียเมื่อหุ้มฉนวนหนา 1” (W/m)	1.7	1.7	2.0	2.1	2.2	2.3	2.3	2.4	2.4

ตารางที่ 6 แสดงความหนาของฉนวนเซลปิด Aeroflex ที่ใช้ป้องกันการเกิดหยดน้ำ และการสูญเสียพลังงานที่มีค่า h_a ต่างๆ กัน ที่อุณหภูมิน้ำ 5°C อุณหภูมิห้อง 30°C ความชื้นสัมพัทธ์ 85 % RH

การป้องกันการเกิดหยดน้ำบนผิวฉนวนที่หุ้มท่อนำความเย็น นั้นมีหลายปัจจัย ไม่เฉพาะด้านอุณหภูมิท่อนำความเย็น, อุณหภูมิห้อง, ความชื้นสัมพัทธ์ และขนาดท่อเท่านั้น แต่ต้องคำนึงในด้านความประณีตในการติดตั้ง ระยะห่างของท่อที่หุ้มฉนวนแล้ว, การไหลไปมาของความชื้น,แหล่งกำเนิดความชื้น ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศ และชนิดของฉนวนที่ใช้ ดังนั้นการคำนวณหาความหนาฉนวนที่ใช้โดยทั่วไปอย่างเดียวไม่เพียงพอ ต้องนำปัจจัยต่างๆ มาร่วมพิจารณาอย่างละเอียดรอบครอบ เพื่อให้อาคารต่างๆ ที่ใช้ระบบทำความเย็นไม่มีปัญหาด้านการเกิดหยดน้ำบนผิวฉนวน (Condensation Problems).